

MODELADO DE UN PROCESO DE MECANIZADO ORTOGONAL MEDIANTE EL
USO DE DINÁMICA EXPLÍCITA EN EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PRESENTADO POR:

MICHAEL FERNANDO PINEDA LANDAZURY

DIRECTOR:

MSc. LUIS CARLOS FLÓREZ GARCÍA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2017

Tabla de contenido

1. Introducción	7
2. Metodología	8
3. Introducción a los procesos de mecanizado por desprendimiento de material.....	9
3.0.1. Movimiento de corte.....	10
3.0.2. Movimiento de avance	6
3.0.3. Movimiento de Penetración.....	10
3.1. Algunos procesos de mecanizado por desprendimiento de material	11
3.1.1. Refrentado.....	11
3.1.2. Cilindrado	11
3.1.3. Fresado	12
4. El proceso de mecanizado ortogonal.....	13
4.1. Definición de parámetros geométricos.....	13
4.1.1. Ángulo de incidencia (α)	14
4.1.2. Ángulo de filo (β)	14
4.1.3. Ángulo de desprendimiento (γ)	14
4.1.4. Plano de cizallamiento	14
4.1.5. Ángulo de cizallamiento (ϕ).....	14
4.1.6. Espesor de viruta indeformada (a_c)	15
4.1.7. Espesor de viruta deformada (a_d).....	15
4.2. Parámetros de corte.....	15
4.2.1. Tiempo de mecanizado (t_m)	15
4.2.2. Tiempo de corte (t_c)	15
4.2.3. Fuerza de corte (F_c)	15
4.2.4. Potencia de corte (W)	15
4.3. Cálculo de la fuerza de corte	15
5. Modelo constitutivo y propiedades.	19
5.1. Modelo constitutivo de Johnson and Cook	19
6. Modelo de falla y propiedades.....	21
6.1. Modelo de fractura de Johnson and Cook	21

7. Realización del modelo tridimensional para el proceso de corte de mecanizado ortogonal.....	22
7.1. Restricciones	22
7.1.1. Apoyos fijos en el eje vertical	22
7.1.2. Apoyos fijos en el eje horizontal	22
7.1.3. Desplazamiento de la herramienta de corte en el eje horizontal	22
8. Resultados obtenidos para mallado hexaédrico.....	23
8.1. Parámetros de mallado.....	23
8.2. Resultados obtenidos para mallado utilizando bias factor	26
8.3. Medición de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento y factor de recalado para mallado con diferentes tamaños de elementos	30
8.4. Medición de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento y factor de recalado para mallado con diferentes tamaños de elementos utilizando bias factor.....	32
8.5. Variación del límite de deformación elástica unitaria en el modelo de falla de Johnson and Cook	34
8.6. Resultados obtenidos para esfuerzos, deformaciones, y velocidad de corte en el proceso final	37
9. Análisis de resultados	40
10. Conclusiones.	42
11. Bibliografía	43

Lista de Figuras

Figura 1. Movimiento de corte en procesos de corte por desprendimiento de material. Tomado de https://goo.gl/57GYqV	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Movimiento de avance en procesos de corte por desprendimiento de material.	10
Figura 3. Movimiento de penetración en procesos de mecanizado por desprendimiento de material. Tomado de https://goo.gl/6L9Vj7	10
Figura 4. Proceso de refrentado. Tomado de https://goo.gl/os982N	11
Figura 5. Proceso de cilindrado. Tomado de https://goo.gl/83cLbr	11
Figura 6. Proceso de fresado. Tomado de https://goo.gl/j6zDDn	12
Figura 7. Esquema de proceso de mecanizado.[7]	13
Figura 8. Parámetros geométricos [7]	14
Figura 9. Representación de las fuerzas presentes en el proceso de corte ortogonal. [7]	15
Figura 10. Plano de Cizallamiento. [7]	16
Figura 11. Relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria.	19
Figura 12. Modelo tridimensional del proceso de mecanizado ortogonal	21
Figura 13. Modelado con ángulo de incidencia α y ángulo de desprendimiento γ	21
Figura 14. Mallado utilizando elementos hexaédricos.....	22
Figura 15. Línea de tendencia para gráfica Deformación elástica vs Número de elementos. .	23
Figura 16. Línea de tendencia para gráfica Deformación plástica vs Número de elementos. .	24
Figura 17. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo equivalente vs Número de elementos...	24
Figura 18. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo cortante vs Número de elementos.	25
Figura 19. Mallado utilizando bias factor	26
Figura 20. Línea de tendencia para gráfica Deformación elástica vs Número de elementos. .	27
Figura 21. Línea de tendencia para gráfica Deformación plástica vs Número de elementos. .	27
Figura 22. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo equivalente vs Número de elementos...	28
Figura 23. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo cortante vs Número de elementos.	28
Figura 24. Tamaño de elementos vs Viruta deformada.	30
Figura 25. Tamaño de elementos vs Ángulo de cizallamiento.	30
Figura 26. Tamaño de elemento vs Factor de recalado.....	31
Figura 27. Valor de la viruta deformada vs Tamaño de elementos.....	32
Figura 28. Tamaño de elementos vs Ángulo de cizallamiento	32

Figura 29. Factor de recalado vs Tamaño de elementos.	33
Figura 30. Deformación elástica vs Límite de deformación unitaria.	34
Figura 31. Deformación Plástic vs Límite de eformación unitaria	34
Figura 32. Esfuerzo de Von Mises vs Límite de deformación unitaria.....	35
Figura 33. Factor de recalado vs Límite de deformación unitaria.	35
Figura 34. Deformación elástica obtenida en el experimento con tamaño de elementos de 0,1 mm utilizando bias factor.	36
Figura 35. Deformación plástica obtenida en el experimento.....	37
Figura 36. Esfuerzo equivalente obtenido en el experimento.	37
Figura 37.Esfuerzo equivalente obtenido en el experimento.	38
Figura 38. Fuerza de corte obtenida en el experimento	38
Figura 39. Relación entre el ángulo de ataque y la fuerza de corte.....	40

Lista de Tablas

Tabla 1. Valores de constantes en el modelo constitutivo de Johnson and Cook para acero AISI4340.	19
Tabla 2. Coeficientes para el modelo de fractura de Johnson and Cook [12]	20
Tabla 3. Tamaño de los elementos para establecer la independencia de malla utilizando elemento hexaédricos.	23
Tabla 4. Tamaño de los elementos para establecer la independencia de malla utilizando bias factor.	26
Tabla 5. Medición de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento, y factor de recalado para mallado con diferentes tamaño de elementos.	29
Tabla 6. Tamaño de elementos, valor de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento, y factor de recalado.	31
Tabla 7. Variación del límite de deformación elástica unitaria en el modelo de falla de Johnson and Cook.	33

1. Introducción.

Los procesos de mecanizado son de gran importancia en la cadena productiva del país, las máquinas herramientas juegan un papel importante en el desarrollo de la economía colombiana. Con la aparición de nuevas tecnologías de producción de piezas, herramientas y accesorios, aparece la necesidad de mejorar la tecnología de mecanizado y la mejora de los procesos de mecanizado [1].

El uso de la simulación computacional viene siendo de vital importancia en la actualidad en el área de corte por viruta, puesto que aplicada a una labor investigativa permite hacer predicciones del comportamiento de materiales a mecanizar, el comportamiento al interactuar con otros materiales y el comportamiento que presenta al entrar en contacto con la herramienta de corte. Estas simulaciones permiten verificar diferentes modelos de forma virtual antes de recurrir a la realización física del proceso, al probar y ejecutar diferentes configuraciones de mecanizado [2], tales como, cambiar el material a mecanizar, diferentes formas de la pieza a mecanizar, variar las dimensiones y ángulos de la herramienta a mecanizar. De esta forma, obtener información de vital importancia que permita escoger las mejores configuraciones a la hora de llevar a cabo la producción, mejorar la calidad y disminuir el costo de sus productos.

La realización de modelos que evalúan el comportamiento físico de los procesos de mecanizado, ayudan a tener información de gran importancia para la implementación en procesos reales de producción. Con la implementación de la dinámica explícita, modelos constitutivos y modelos de falla en elementos finitos, se enfatiza en zonas donde se produce la interacción entre el material a mecanizar y la herramienta de corte [3]. Al aplicar los modelos mencionados se obtiene información cualitativa y cuantitativa de variables asociadas al proceso de mecanizado ortogonal como temperatura, esfuerzos, tipo y forma de viruta, tensiones residuales, velocidad de corte, influencia de la geometría de la herramienta de corte, influencia de la fricción, ángulo de ataque de la herramienta de corte, ángulo de incidencia de la herramienta de corte, etc.

2. Metodología.

Este proyecto se fundamenta bajo la formulación de una investigación básica, la cual tiene como finalidad el modelado de un proceso de mecanizado ortogonal mediante el uso de dinámica explícita en el método de elementos finitos.

Primero se realiza una recolección de información bibliográfica sobre los parámetros y variables asociadas al proceso de mecanizado ortogonal. Luego, se analiza la influencia de estas propiedades en los procesos de mecanizado.

Se hace el estudio y recolección bibliográfica de los modelos constitutivos y los modelos de falla asociados al material a mecanizar, así como cuales son más factibles para el proceso de mecanizado ortogonal.

Estableciendo las condiciones de frontera, los modelos constitutivos y modelos de falla válidos, se realiza el proceso de simulación para el mecanizado ortogonal con el módulo **Explicit dynamics** del software **Ansys Workbench** aplicando las variables apropiadas asociadas al proceso de mecanizado.

Se hace la comparación de los resultados con resultados obtenidos por otros autores como M. C. Shaw [13], en su libro se hace el análisis de resultados con base a resultados de demás autores para llegar finalmente a las conclusiones obtenidas en nuestros estudios.

3. Introducción a los procesos de mecanizado por desprendimiento de material.

Los procesos de mecanizado por desprendimiento de material siguen siendo usados en la actualidad a pesar de la aparición de nuevas tecnologías como las herramientas CAM para la elaboración de piezas y accesorios, por lo que máquinas como tornos y fresadoras siguen vigentes en el mercado. En máquinas herramientas como tornos y fresadoras se puede realizar un número significativo de operaciones de mecanizado.

El mecanizado por arranque de viruta es un proceso en el cual interactúa una máquina-herramienta, un bloque de material y elementos de sujeción; en las máquinas herramientas se colocan y sujetan las piezas a mecanizar, además realiza los movimientos por los cuales se consigue realizar la remoción de material en forma de viruta. La herramienta de corte se encarga de cortar el material en forma de viruta; soporta el calor, fuerza, dureza y resistencia al desgaste producida por el proceso de corte. Los elementos de sujeción permiten una unión sólida entre la pieza y la máquina, como también la unión entre la herramienta de corte y la máquina herramienta de corte [4].

Los movimientos necesarios para realizar el desprendimiento de material son:

3.0.1. Movimiento de corte:

Se logra el arranque de viruta durante una revolución o carrera. Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

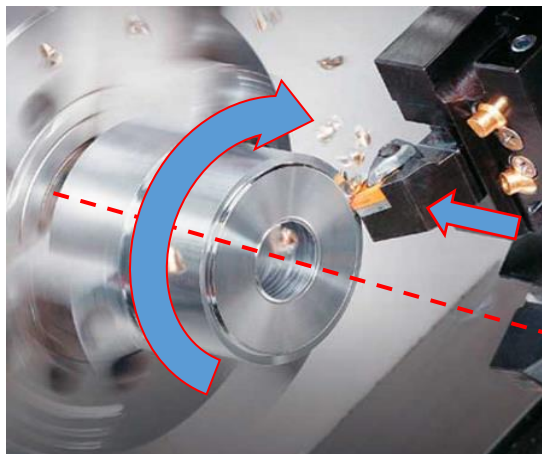


Figura 1. Movimiento de corte en procesos de corte por desprendimiento de material.

Tomado de <https://goo.gl/57GYqV>

3.0.2. Movimiento de avance:

Al combinarse con el corte se produce un arranque continuo. Ver

Figura 1.

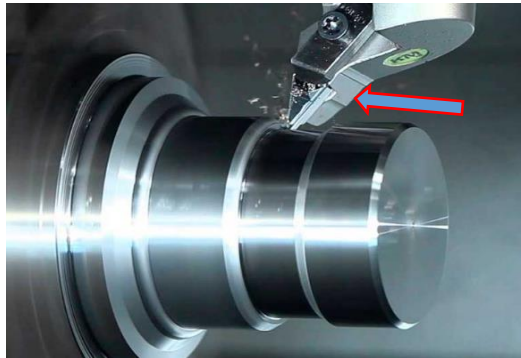


Figura 1. Movimiento de avance en procesos de corte por desprendimiento de material.

Tomado de <https://goo.gl/RJK8B2>

3.0.3. Movimiento de Penetración:

Dicho movimiento determina la profundidad de corte.

La finalidad en el proceso de mecanizado como se aprecia en la Figura 2. Movimiento de penetración en procesos de mecanizado por desprendimiento de material. Tomado de <https://goo.gl/6L9Vj7> **Figura 2**, es conseguir una pieza con forma y geometría deseada. Al inicio del proceso se origina arranque de viruta en la pieza cuando la herramienta de ataque entra en contacto con la superficie de ésta, en la segunda parte del proceso el desprendimiento de material se da gracias a la acción de granos abrasivos que no tienen una forma geométricamente determinada [5].

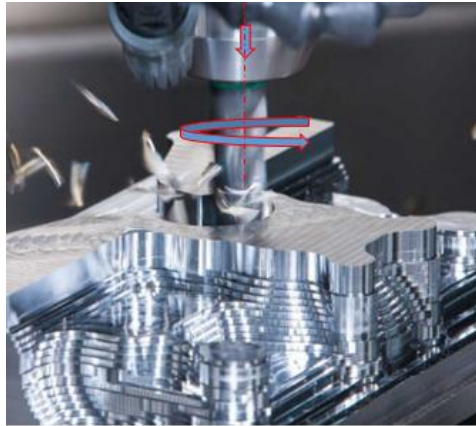


Figura 2. Movimiento de penetración en procesos de mecanizado por desprendimiento de material. Tomado de <https://goo.gl/6L9Vj7>

A continuación, se realiza una breve descripción de los procesos de corte por desprendimiento de material.

3.1. Algunos procesos de mecanizado por desprendimiento de material.

3.1.1. Refrentado:

Básicamente como se observa en la **Figura 3**, consiste en el direccionamiento de la herramienta al eje perpendicular de la pieza. El refrentado puede ser de total, en dicho caso la herramienta de corte realiza movimientos desde el diámetro exterior de la pieza hasta el eje de revolución o un agujero; el caso más usado es el refrentado parcial que se origina en el acabado de la pieza en el cual el mecanizado se forma en pequeños tramos de la pieza [6].



Figura 3. Proceso de refrentado. Tomado de <https://goo.gl/os982N>

3.1.2. Cilindrado:

En el proceso de cilindrado la herramienta de corte actúa paralelo al eje de revolución de la pieza. Se consigue rebajar el diámetro de la pieza partiendo de barras cilíndricas y haciendo pasadas con el fin de lograr un acabado de forma cilíndrica [6]. Ver Figura 4.



Figura 4. Proceso de cilindrado. Tomado de <https://goo.gl/83cLbr>

3.1.3. Fresado:

Consiste en la combinación de una herramienta rotativa y el avance de la pieza, ver Figura 5. La fresa al estar formada por varios filos desprende el material con facilidad, por tanto es un proceso de gran versatilidad. Independientemente del tipo de fresado, la herramienta que se escoja realizará un tipo de fresado planeado, fresado periférico o fresado axial [6].



Figura 5. Proceso de fresado. Tomado de <https://goo.gl/j6zDDn>

4. El proceso de mecanizado ortogonal.

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta pueden asimilarse al mostrado en la Figura 6, en dicha figura se aprecia como la herramienta de corte desprende material al entrar en contacto con la pieza, desplazándose con una velocidad resultante V [7].

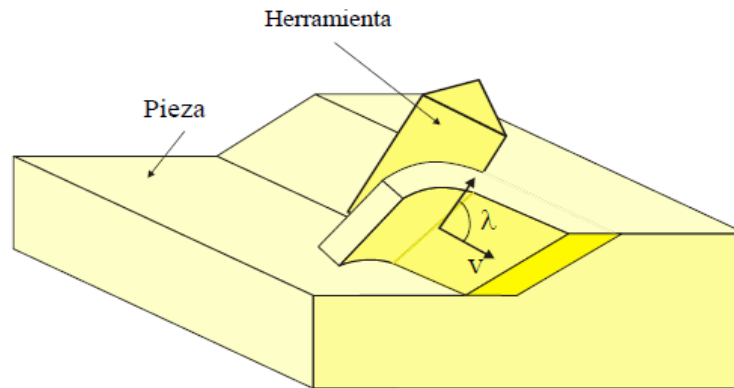


Figura 6. Esquema de proceso de mecanizado.[7]

Cuando el ángulo formado por la velocidad de corte y la arista de corte llamado **ángulo de inclinación** (λ) es igual a noventa grados, el proceso de corte es ortogonal, mientras que para $\lambda \neq 90$ el modelo de corte se denomina corte oblicuo [7].

4.1. Definición de parámetros geométricos.

Los influencia de los parámetros geométricos son objeto de estudio en el desarrollo de este experimento, para ello es necesario definir dichas variables, su comportamiento y efectos que tienen en el desarrollo de nuestro estudio.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 7 , Se puede observar la representación de cada una de las variables, su ubicación en la herramienta de ataque y en la pieza a cortar. Con la medición de dichos parámetros se establecen puntos de partida para la solución y posterior análisis de los procesos de corte ortogonal. [7]

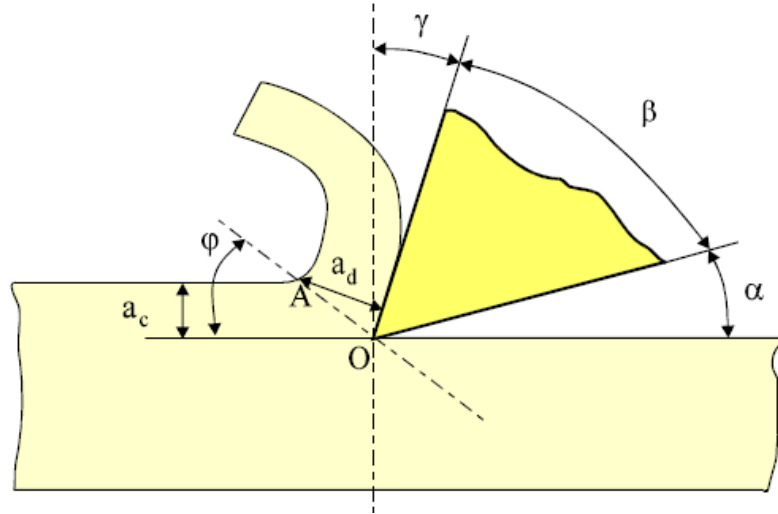


Figura 7. Parámetros geométricos [7]

4.1.1. Ángulo de incidencia (α): Es el ángulo formado por la cara de incidencia de la herramienta y la dirección perpendicular a la superficie mecanizada. Generalmente se usa entre 5° y 10° , se busca que sea lo más pequeño posible pero en tamaños menores a 5° ocasiona un aumento significativo de temperatura ocasionado por el rozamiento entre la herramienta de corte y la superficie que puede alterar las propiedades geométricas y mecánicas [7].

4.1.2. Ángulo de filo (β): Es el ángulo formado por las caras de incidencia y desprendimiento de la herramienta.

4.1.3. Ángulo de desprendimiento (γ): es el ángulo originado por la cara de desprendimiento y la superficie perpendicular a la superficie mecanizada. El ángulo mecanizado toma valores entre -5° y 30° ; cuando el ángulo de desprendimiento es igual al ángulo de incidencia se obliga a emplear herramientas con menor ángulo de filo, que presentan mayor posibilidad de rotura y menor evacuación de calor. [7]

4.1.4. Plano de cizallamiento: Es el plano teórico en el que se produce la deformación del material de la pieza.

4.1.5. Ángulo de cizallamiento (ϕ): Es el ángulo formado por la superficie de la pieza y el ángulo de cizallamiento [7].

4.1.6. Espesor de viruta indeformada (a_c): Es el espesor del material que va a ser removido antes de sufrir algún tipo de deformación.

4.1.7. Espesor de viruta deformada (a_d): Es el espesor de la viruta deformada.

4.2. Parámetros de corte.

4.2.1. Tiempo de mecanizado (t_m): Es el tiempo en el que hay desplazamiento relativo entre la pieza y la herramienta.

4.2.2. Tiempo de corte (t_c): En dicho tiempo se produce eliminación de material, puede ser igual o menor al tiempo de mecanizado.

4.2.3. Fuerza de corte (F_c): Es el valor de la fuerza necesaria para eliminar material de la pieza en la dirección de la velocidad de corte.

4.2.4. Potencia de corte (W): Es la energía necesaria por unidad de tiempo para eliminar material de la pieza.

4.3. Cálculo de la fuerza de corte

En la Figura 8, se representan las fuerzas presentes en el proceso de corte ortogonal. Al considerar que la línea de acción de las fuerzas de acción/reacción entre pieza y herramienta pasa por la arista de corte y que no hay presentes momentos flectores, se plantea la situación en la que **R** representa la resultante de las fuerzas que la herramienta ejerce sobre la pieza. Si **R** se descompone en el plano de cizallamiento **F_s** y su normal **N_s**, apareciendo los ángulos ϕ (ángulo de cizallamiento) y ρ (ángulo de deslizamiento) [7].

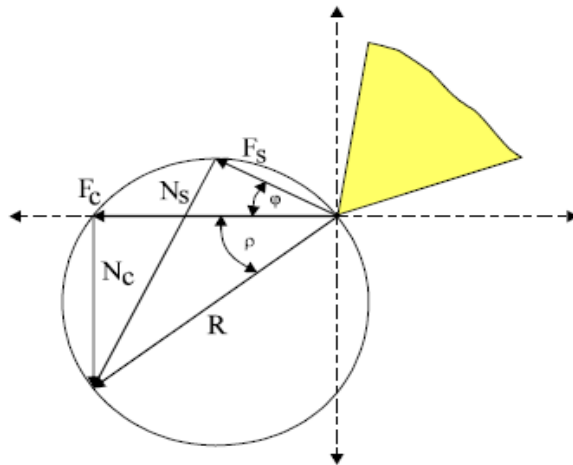


Figura 8. Representación de las fuerzas presentes en el proceso de corte ortogonal [7].

De la Figura 8, se obtiene:

$$F_c = R \cos \rho \quad (1)$$

$$F_s = R \cos (\phi + \rho) \quad (2)$$

$$N_c = R \operatorname{sen} \rho \quad (3)$$

$$N_s = R \operatorname{sen} (\phi + \rho) \quad (4)$$

$$F_c = F_s \frac{\cos \rho}{\cos (\phi + \rho)} \quad (5)$$

A continuación se hace la representación del plano de cizallamiento y las variables que se presentan en el mismo.

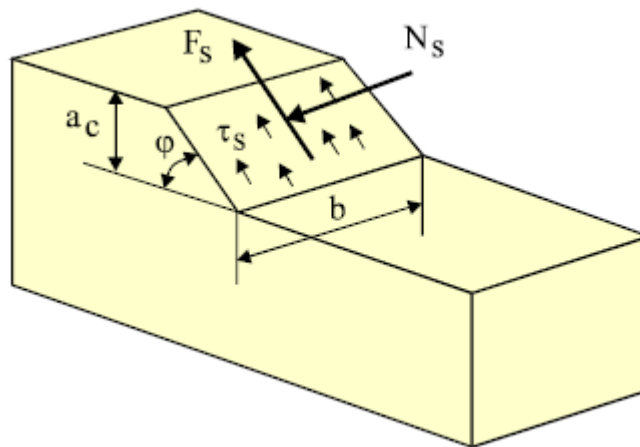


Figura 9. Plano de Cizallamiento. [7]

τ_s es una constante propia de cada material llamada **tensión dinámica de deslizamiento**, una distribución de tensiones en el plano de deslizamiento; con la tensión dinámica de deslizamiento se puede calcular el valor de **Fs** Así:

$$F_s = \tau_s A_s = \tau_s b \frac{a_c}{\sin \phi} = \frac{\tau_s}{\sin \phi} A_c \quad [7]. \quad (6)$$

El valor del ángulo de deslizamiento es desconocido, por ello se requiere una ecuación más que relacione el ángulo de deslizamiento con las otras variables. Con la **hipótesis de Merchant** es posible establecer las relaciones mediante las siguientes consideraciones:

- El plano de deslizamiento en un proceso de corte ortogonal, de forma tal que la potencia necesaria para la deformación es mínima [7].

$$Pot = \dot{W} = F_c V = \frac{\tau_s}{\sin \phi} \frac{\cos \rho}{\cos (\phi + \rho)} A_c V \quad (7)$$

Esto se logra cuando el denominador es máximo, es decir:

$$\frac{\partial}{\partial \phi} [\sin \phi \cos (\phi + \rho)] = 0 \quad (8)$$

Dicha condición se logra cuando [7]:

$$\phi + \rho = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (9)$$

En donde al final se obtiene la siguiente expresión para la fuerza de corte [7]:

$$F_c = 2\tau_s A_c \cot \phi \quad (10)$$

5. Modelo constitutivo y propiedades.

La ecuación constitutiva como formulación física – matemática, describe el comportamiento termomecánico para materiales sometidos a condiciones de carga. La complejidad de las ecuaciones constitutivas depende del material y de las hipótesis que se deseen aplicar en el modelo. El modelo a utilizar es un modelo elastoplástico con constantes utilizadas en el desarrollo de procesos de mecanizado [8]. El modelo constitutivo de Johnson and Cook no está basado en la teoría tradicional de plasticidad, éste reproduce respuestas de materiales observadas de impactos y penetración en los metales.[9]

Los modelos numéricos se basan en la utilización de procesos de simulación, al utilizar el método de elementos finitos y mediante una discretización del modelo en el espacio – tiempo, se llevan a cabo las simulaciones mediante el uso de ordenadores. El método o los métodos numéricos utilizados proporcionan gran cantidad de información en el proceso (esfuerzos, tensiones, zonas dañadas, deformaciones, etc) [10].

En las últimas décadas, los diferentes estudios realizados para materiales permiten conocer el comportamiento de éstos para diferentes tipos y sollicitaciones de carga, conociendo de una manera fiable la respuesta de los materiales ante diferentes tipos de ensayo [8]. Se tiene en consideración el uso de un modelo constitutivo para el análisis del proceso de mecanizado ortogonal implementando como material de la pieza a mecanizar el acero AISI SAE 4340. La solución de los modelos se realiza con el uso del módulo de **dinámica explícita** en **Ansys Workbench**. El modelo a utilizar es la ley constitutiva de Johnson and Cook [11].

5.1. Modelo constitutivo de Johnson and Cook.

La ley de Johnson and Cook es el modelo constitutivo con mayor popularidad utilizado en la simulación de procesos de corte, se conforma de aspectos de plasticidad, térmicos y viscosos en tres términos independientes [8].

La forma básica del modelo es fácilmente adaptable a la mayoría de los computadores desde que sea usada la ecuación 11, así como las constantes propias obtenidas mediante literatura para el material objeto de estudio [10]. La relación resultante entre el esfuerzo y la deformación

unitaria tiene varias tasas de deformación. El punto del esfuerzo máximo puesto que representa el punto en donde ocurre la desestabilización de la deformación unitaria. Figura 10.

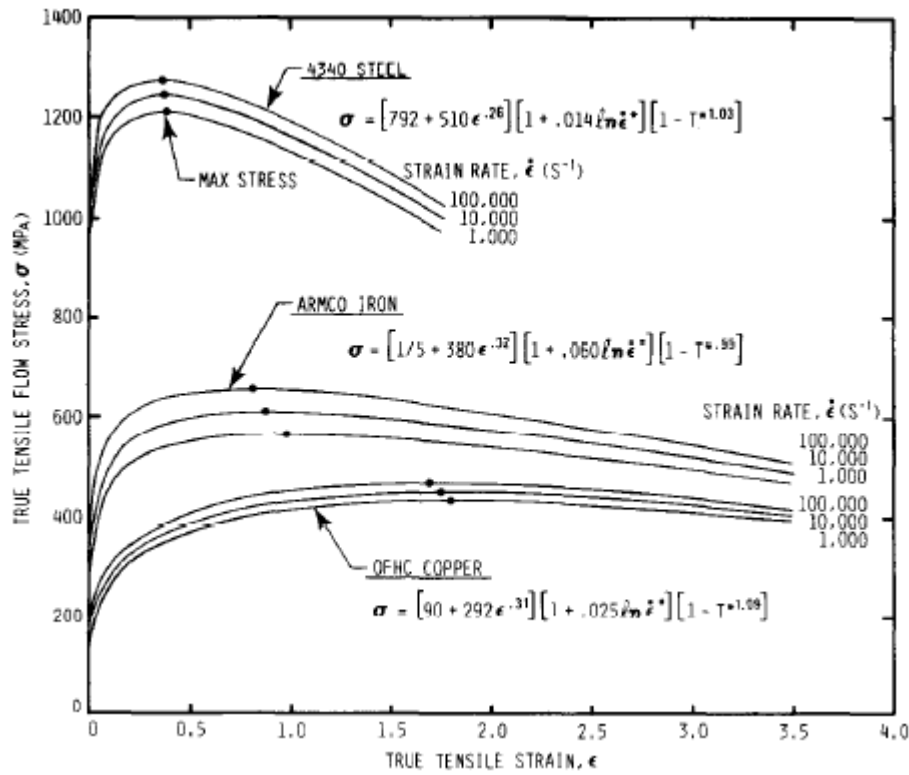


Figura 10. Relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) \left(1 - \left[\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right]^m \right) \quad (11)$$

En donde T_{melt} es la temperatura de fusión, T_{room} es la temperatura de la sala (considerada como 298 K) y $\dot{\epsilon}_0$ es la relación de la deformación de referencia. A, B, C y n son constantes propias del material [8]. Ver Tabla 1

Acero	A (Mpa)	B (Mpa)	n	C	M
AISI 4340	792	510	0,26	0,014	1,03

Tabla 1. Valores de constantes en el modelo constitutivo de Johnson and Cook para acero AISI4340.

6. Modelo de falla y propiedades

El modelo de falla está elaborado para mostrar los efectos relativos de varios parámetros, también cuenta para contar los daños acumulados de los daños en los procesos por deformación, el modelo representa un número limitante de constantes.

6.1. Modelo de fractura de Johnson and Cook

El modelo de fractura de Johnson and Cook es realizado incluyendo esfuerzos triaxiales, tasa de deformación, y temperatura en la deformación a la fractura [12].

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \epsilon^{\circ*}] [1 + D_5 T^*]. \quad [10] \quad (12)$$

Donde D_1, D_2, D_3, D_4 , y D_5 son constantes del material σ^* es el ratio del promedio del esfuerzo triaxial normal al esfuerzo equivalente de von Mises asumido $\sigma^* \leq 1,5$, $\ln \epsilon^{\circ*}$ es la tasa de deformación adimensional, y T^* es la temperatura homóloga [9].

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (13)$$

El modelo de fractura es basado en las constantes ($\sigma^*, \epsilon^{\circ*}$, y T^*), dicho modelo es preciso bajo las condiciones de dichas constantes hasta extenderse al esfuerzo equivalente, la deformación equivalente. [10]

AISI 4340	D1	D2	D3	D4	D5	Melting Temp (K)	Transition Temp (K)	Reference Strain rate (mm/ s)
	0,050	3,440	-2,120	0,002	0,610	1793	255	7500

Tabla 2. Coeficientes para el modelo de fractura de Johnson and Cook [12] .

7. Realización del modelo tridimensional para el proceso de corte de mecanizado ortogonal.

En la realización del modelo se tiene en cuenta las restricciones en los apoyos, así como las diferentes condiciones de frontera.

7.1. Restricciones.

Con el fin de dar una solución aproximada a la realidad el problema se plantea las siguientes restricciones:

7.1.1. Apoyos fijos en el eje vertical: La pieza a trabajar no se puede desplazar en el eje vertical. Ver Figura 11. Modelo tridimensional del proceso de mecanizado ortogonal.

7.1.2. Apoyos fijos en el eje horizontal: La pieza a trabajar no se puede desplazar en el eje horizontal. Ver Figura 12 .

7.1.3. Desplazamiento de la herramienta de corte en el eje horizontal: La herramienta de corte se desplaza 20 mm en la dirección horizontal.

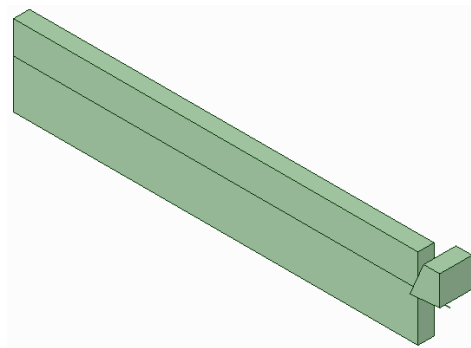


Figura 11. Modelo tridimensional del proceso de mecanizado ortogonal

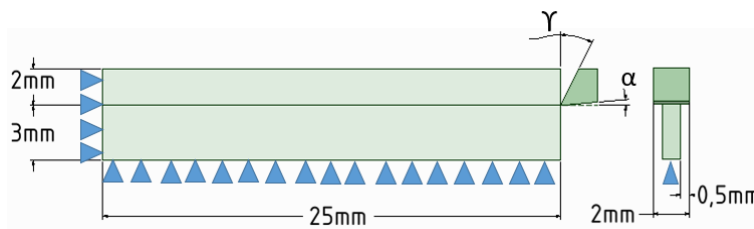


Figura 12. Modelado con ángulo de incidencia α y ángulo de desprendimiento γ .

8. Mallado hexaédrico del modelo de mecanizado.

Se realiza el mallado hexaédrico con el fin de analizar la pieza dada su morfología y evaluar las diferentes condiciones del proceso mediante el método de elementos finitos utilizando la mecánica computacional.

8.1. Parámetros de mallado.

Dada la forma de la pieza objeto de simulación se escogen elementos hexaédricos para generar el mallado. Se varía el valor del tamaño para los elementos hasta buscar una convergencia en la línea de tendencia para los resultados

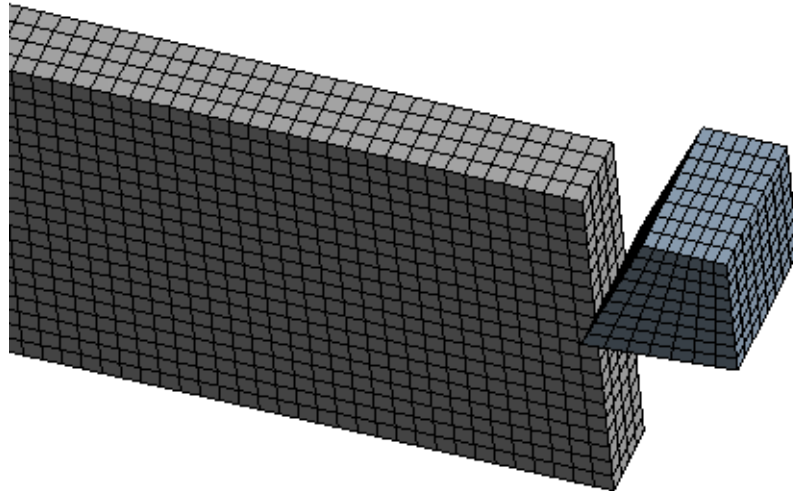


Figura 13. Mallado utilizando elementos hexaédricos.

Al realizar una independencia de malla se llega a los parámetros de mallado adecuados para la simulación, con dichos parámetros se obtienen resultados confiables donde la variación de la malla en el modelo no influye sobre estos resultados. Se hace el mallado variando el tamaño de los elementos hexaédricos para establecer la convergencia y fiabilidad de los resultados con los siguientes valores:

Medida (mm)	#Nodos	#Elementos	Deformación elástica (mm/mm)	Deformación plástica (mm/mm)	Esfuerzo equivalente (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)
0,500	1833	1080	1,2067	1,2067	1214,4	436,09
0,450	3144	2116	1,1453	1,3027	1214,8	530,69
0,400	3794	2577	1,2503	0,93762	1220,3	499,63
0,350	5008	3450	1,5305	1,207	1227,8	685,69
0,300	8082	5992	1,4821	1,1224	1235,9	687,67
0,250	11325	8504	1,5957	1,0729	1235	544,06
0,200	20844	16505	1,6479	1,0037	1240	642,01
0,150	49740	41902	2,0729	1,2109	1245	637,09
0,125	78453	67536	2,37	1,3261	1247,5	611,38
0,100	148665	131720	1,9459	1,1879	1247	623,08

Tabla 3. Tamaño de los elementos para establecer la independencia de malla utilizando elemento hexaédricos.

Con dichos tamaños de elementos se obtuvo una convergencia de malla para un número de elementos de 131720, equivalente a elementos con tamaño de 0,1 mm.

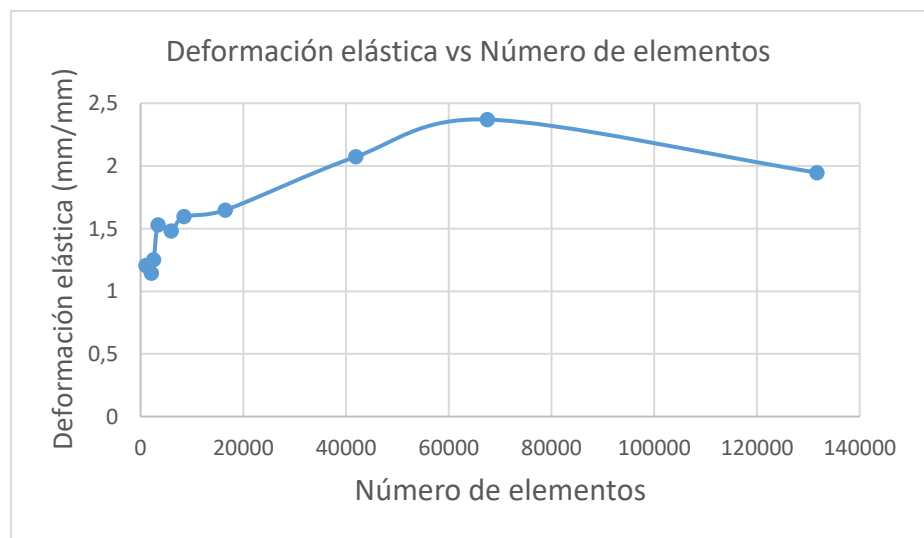


Figura 14. Línea de tendencia para gráfica Deformación elástica vs Número de elementos.

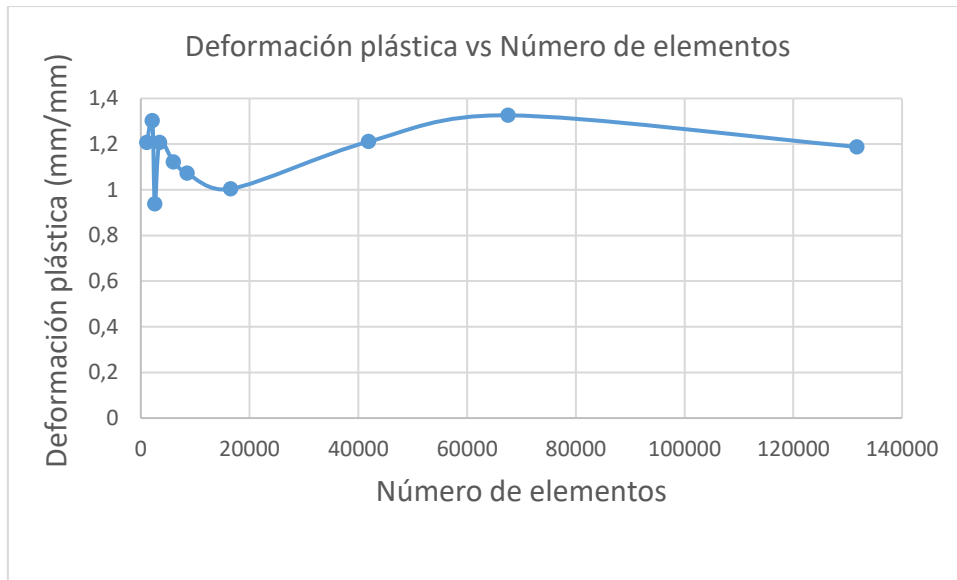


Figura 15. Línea de tendencia para gráfica Deformación plástica vs Número de elementos.

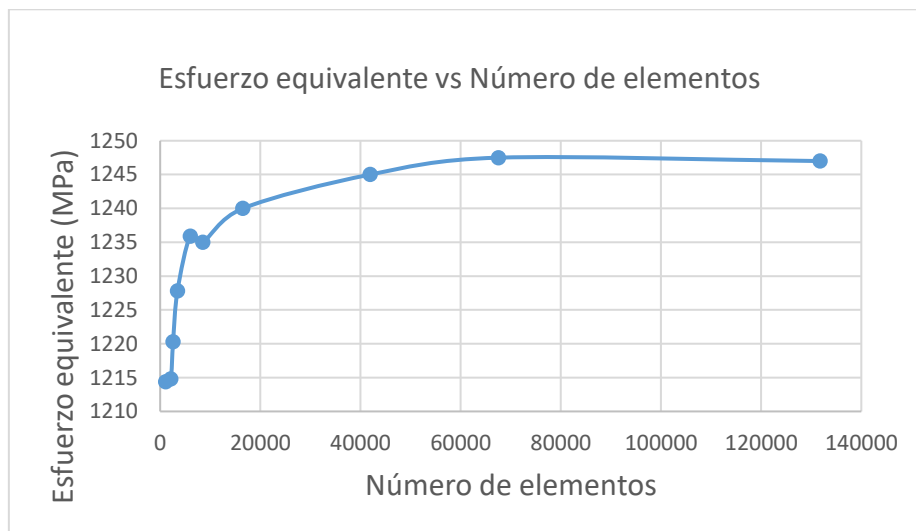


Figura 16. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo equivalente vs Número de elementos.

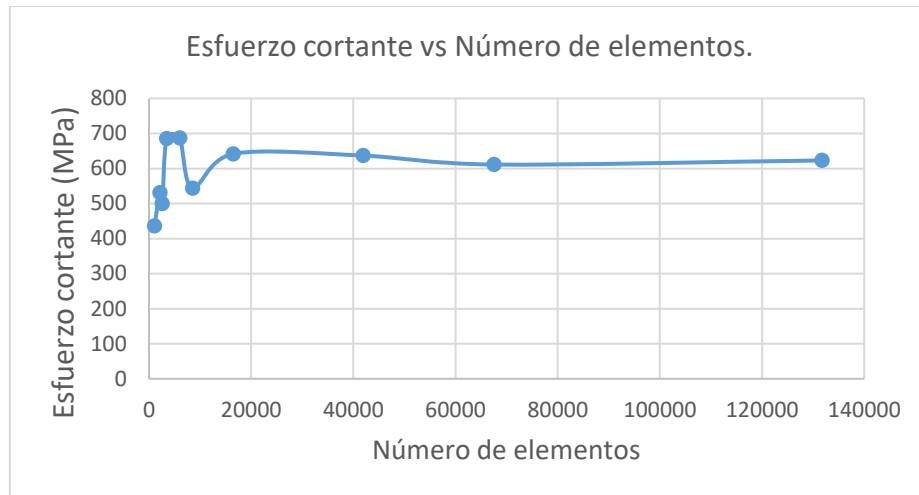


Figura 17. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo cortante vs Número de elementos.

8.2.Resultados obtenidos para mallado utilizando bias factor.

Se hace el mallado enfatizando en la zona en donde entra en contacto la herramienta de corte con la pieza a mecanizar; para ello se realiza la división del bloque a cortar en dos partes, una de 2 mm x 25 mm y otra de 3 mm x 25 mm, se comparte la topología entre las partes separadas para que tengan el comportamiento de una sola pieza, pero a su vez haya una facilidad en el mallado tratando de que en la unión de éstas se logre un mallado con elementos más pequeños dada que es la zona en donde se da el ataque y el desprendimiento de material. Aplicando un factor de bias de 2, se logra que los elementos en dicha zona sean dos veces menores en tamaño a los elementos de las zonas menos críticas en el proceso.

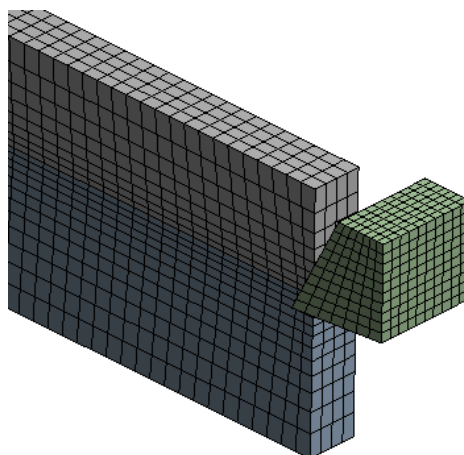


Figura 18. Mallado utilizando bias factor

Al utilizar en el mallado “bias factor” se hizo el estudio de convergencia para los mismos valores que el mallado anterior.

Medida (mm)	#Nodos	#Elementos	Deformación elástica (mm/mm)	Deformación plástica (mm/mm)	Esfuerzo equivalente (MPa)	Esfuerzo cortante (MPa)
0,500	11340	7284	1,7823	1,2514	1235	643,22
0,450	15820	11440	2,0779	1,5932	1248,4	653,89
0,400	15850	11460	1,9614	1,5733	1264,4	645,72
0,350	16260	11760	2,7915	1,4905	1227,9	672,24
0,300	20832	16072	2,9787	1,8968	1240,6	631,95
0,250	21030	16224	3,279	2,1903	1237,4	631,24
0,200	26178	21040	3,0041	2,1667	1255,2	608,08
0,150	36475	30772	2,8713	2,5371	1240	647,83
0,12	48138	41778	3,3791	2,5445	1238,9	632,47
0,100	55077	48300	2,9614	2,1697	1238,9	623,08

Tabla 4. Tamaño de los elementos para establecer la independencia de malla utilizando bias factor.

Al utilizar bias factor se obtuvo una convergencia de malla para 48300 elementos, equivalente al tamaño de elementos de 0,1 mm.

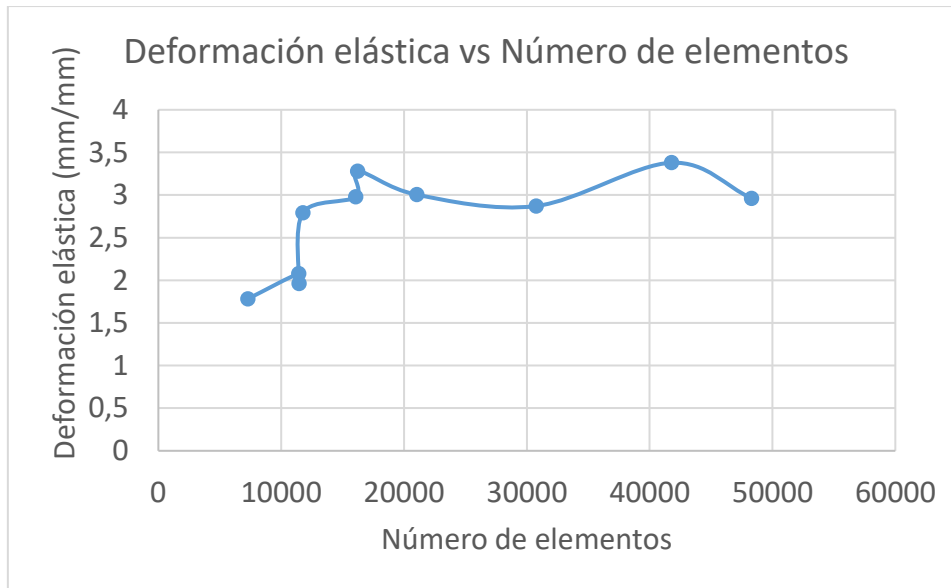


Figura 19. Línea de tendencia para gráfica Deformación elástica vs Número de elementos.

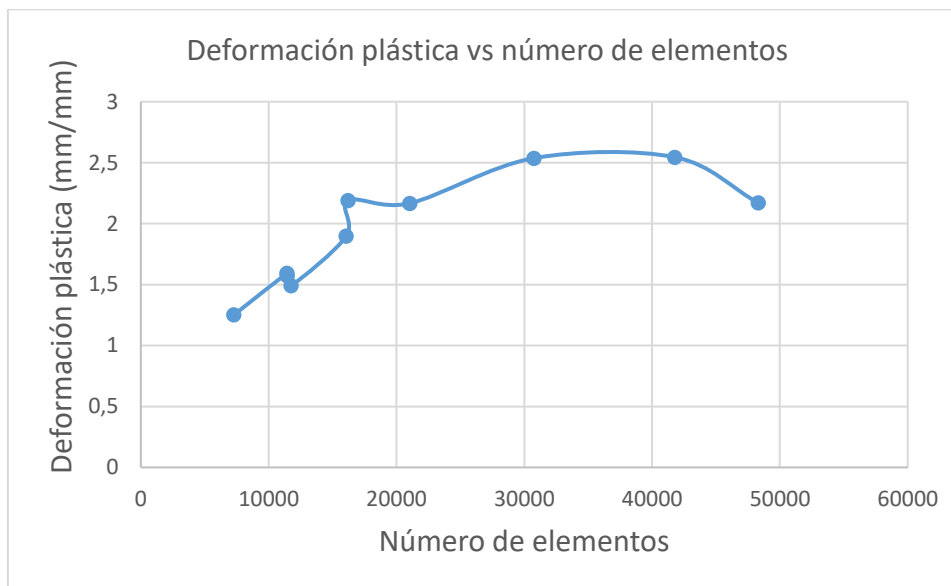


Figura 20. Línea de tendencia para gráfica Deformación plástica vs Número de elementos.

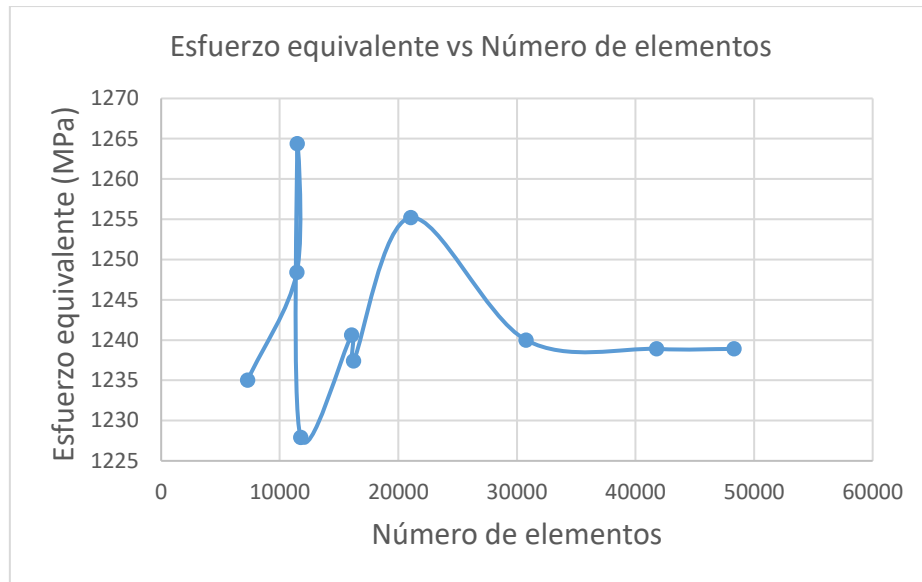


Figura 21. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo equivalente vs Número de elementos.

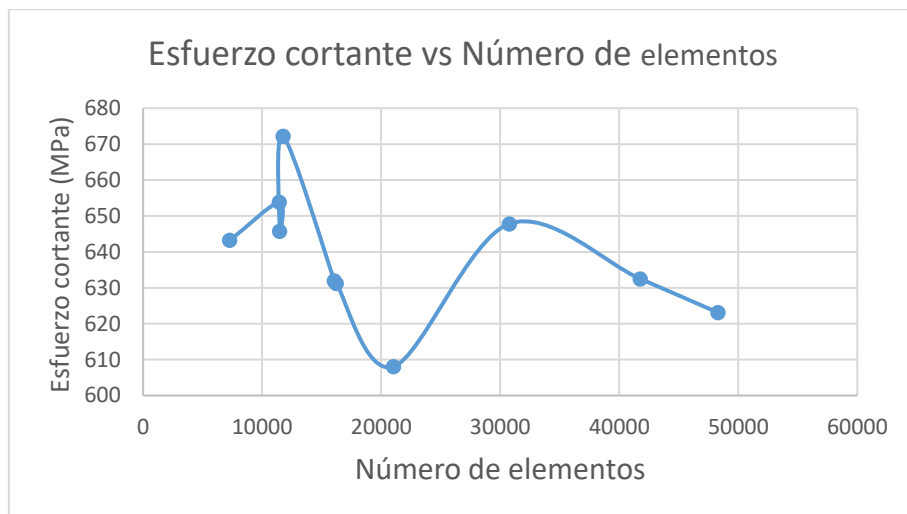


Figura 22. Línea de tendencia para gráfica Esfuerzo cortante vs Número de elementos.

Aunque las líneas de tendencia para el mallado cuando no se utiliza bias tiene un comportamiento más suave se decide utilizar el mallado con bias debido a que se realiza en una zona crítica del proceso, por lo cual se obtienen resultados más acercados a la realidad en las simulaciones.

8.3. Medición de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento y factor de recalado para mallado con diferentes tamaños de elementos.

Se hace el mallado hexaédrico con diferentes tamaños de elementos para evaluar el comportamiento de las variables geométricas como el valor de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento y el factor de recalado. Para ello se hace la variación del tamaño de elementos con los datos establecidos en la Tabla 5, con el fin de obtener las variables de la Figura 11.

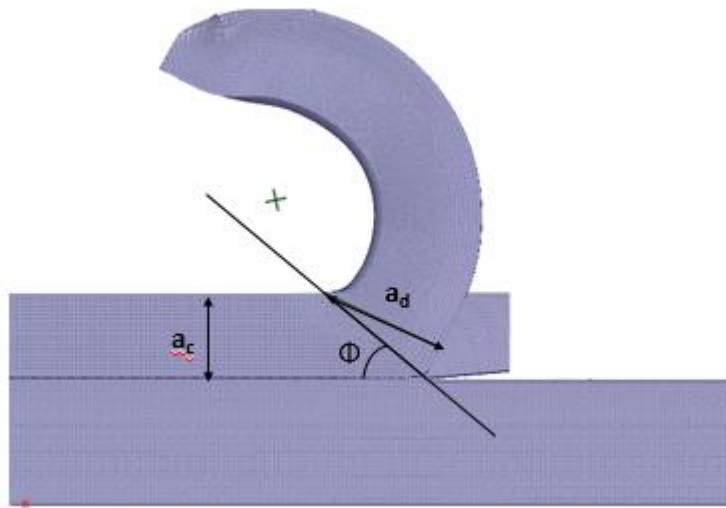


Figura 12. Representación de ángulo de cizallamiento, espesor de viruta deformada, y espesor de viruta sin deformar.

Tamaño elementos (mm)	Número de elementos	Valor de viruta deformada a_d (mm)	Ángulo de Cizallamiento Φ (grados)	Factor de recalado
0,500	7284	2,411	51,687	1,2055
0,450	11440	2,592	46,316	1,296
0,400	11460	2,59	46,203	1,295
0,350	11760	2,409	50,739	1,2045
0,300	16072	2,525	48,007	1,2625
0,250	16224	2,381	52,195	1,1905
0,200	21040	2,578	47,891	1,2892
0,125	30772	2,723	44,422	1,3615
0,100	41778	2,755	44,421	1,3775

Tabla 5. Medición de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento, y factor de recalado para mallado con diferentes tamaño de elementos.

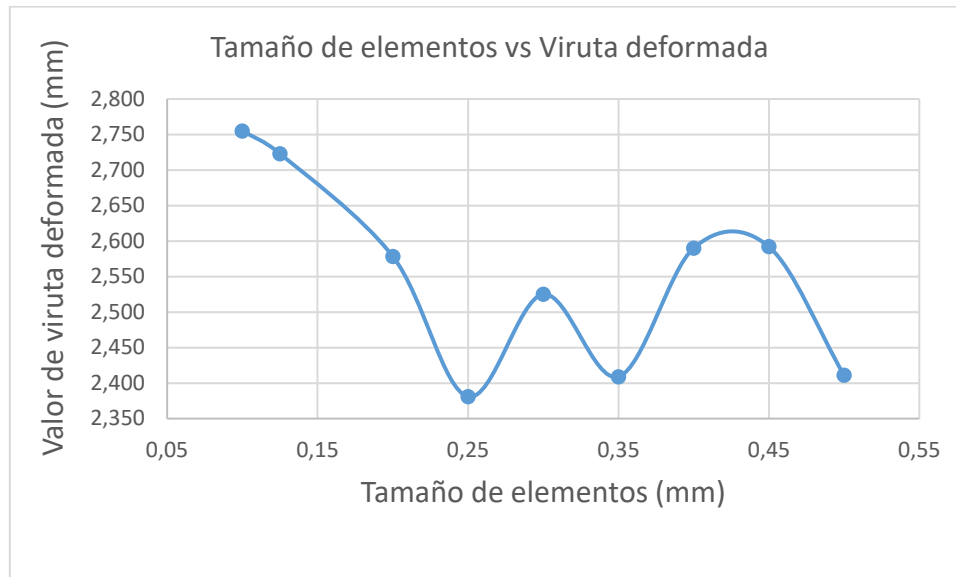


Figura 23. Tamaño de elementos vs Viruta deformada.

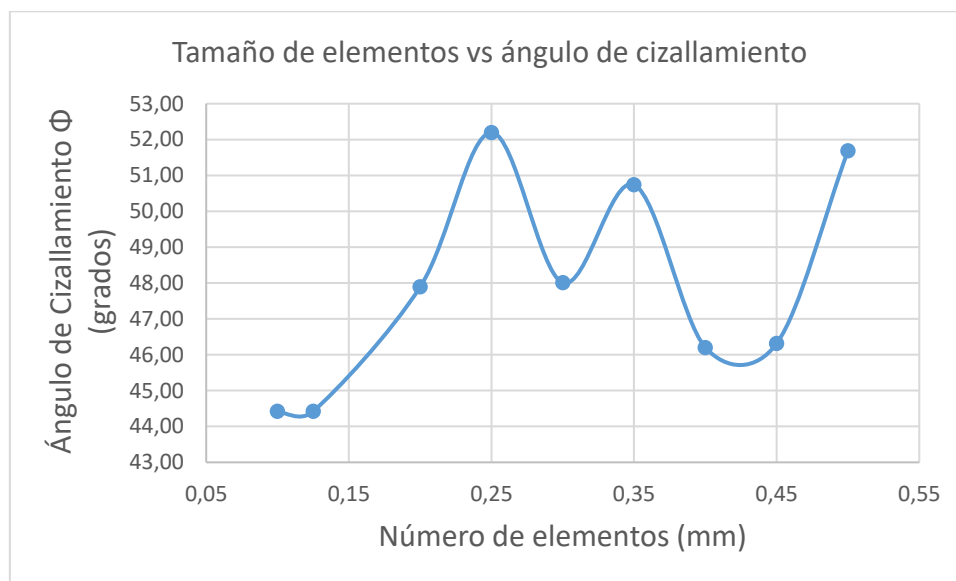


Figura 24. Tamaño de elementos vs Ángulo de cizallamiento.

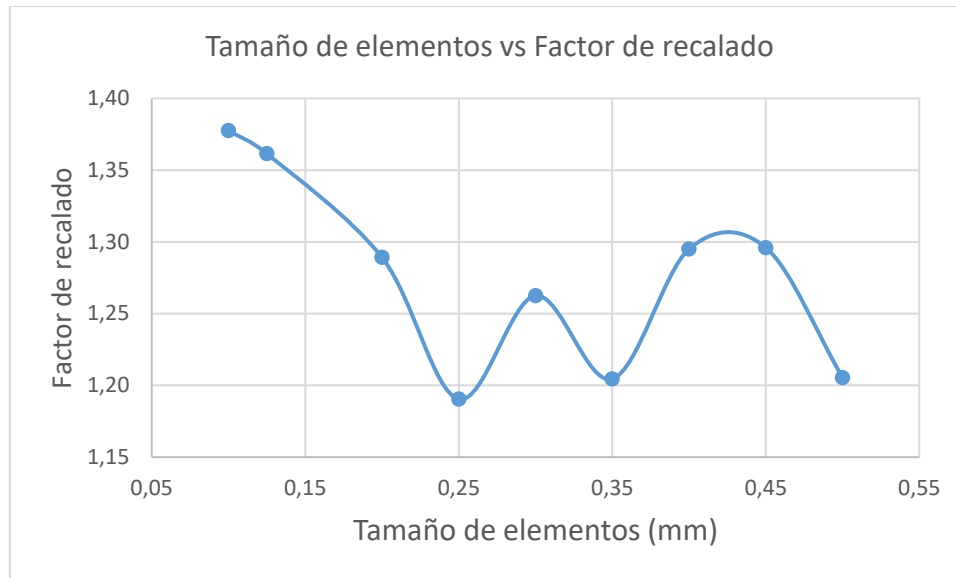


Figura 25. Tamaño de elemento vs Factor de recalado.

8.4. Medición de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento y factor de recalado para mallado con diferentes tamaños de elementos utilizando bias factor.

Se realiza el mallado utilizando bias factor con el fin de evaluar los efectos causados en las variables representadas en la Figura 11, haciendo la variación del tamaño de los elementos como se muestra en la Tabla 6.

Tamaño elementos (mm)	Número de elementos	Valor de viruta deformada a_d (mm)	Ángulo de Cizallamiento Φ (grados)	Factor de recalado
0,50	7284	2,51	48,012	1,255
0,45	11440	2,27	54,46	1,135
0,40	11460	2,37	53,972	1,185
0,35	11760	2,68	45	1,34
0,30	16072	2,68	45	1,34
0,25	16224	2,68	45	1,34
0,20	21040	2,68	45	1,34
0,15	41778	2,68	45	1,34
0,10	48300	2,68	45	1,34

Tabla 6. Tamaño de elementos, valor de la viruta deformada, ángulo de cizallamiento, y factor de recalado.

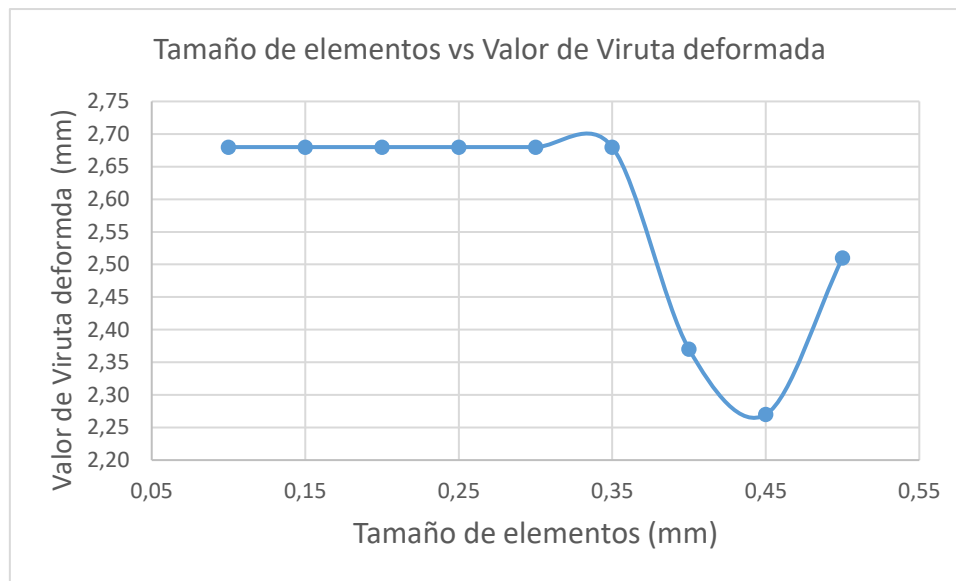


Figura 26. Valor de la viruta deformada vs Tamaño de elementos.

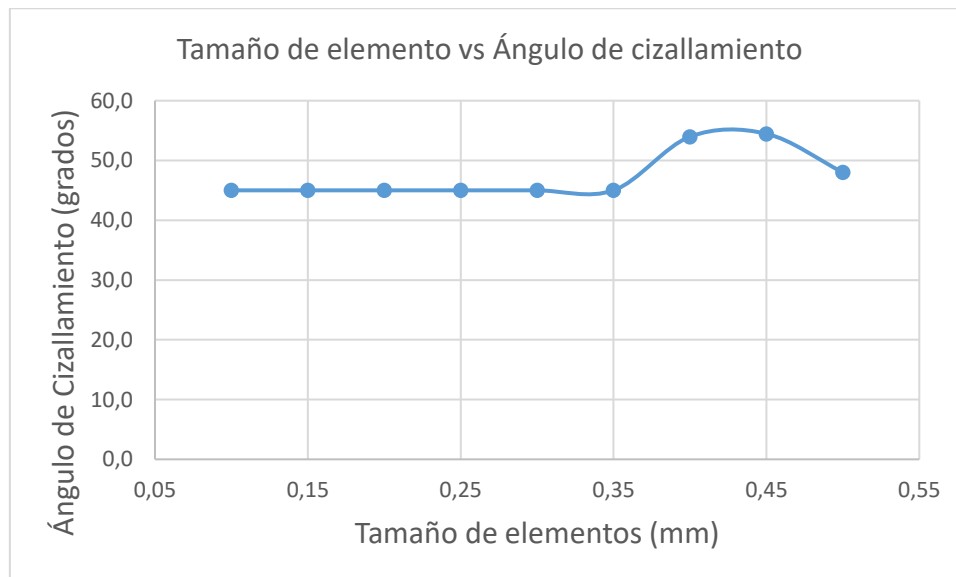


Figura 27. Tamaño de elementos vs Ángulo de cizallamiento

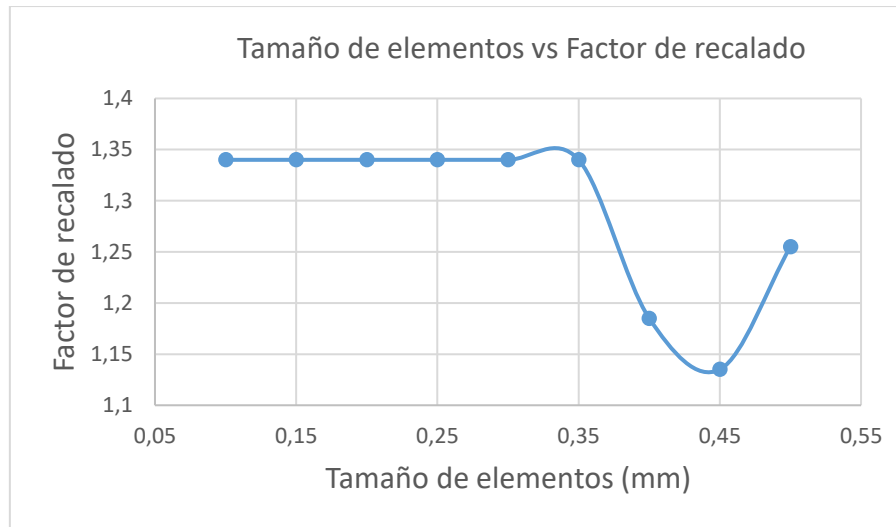


Figura 28. Factor de recalado vs Tamaño de elementos.

8.5. Variación del límite de deformación elástica unitaria en el modelo de falla de Johnson and Cook.

El límite de deformación unitaria es una variable de suma importancia en el análisis y estudio de los esfuerzos y deformaciones, se estudia cómo influye ésta al variar utilizando el modelo de fractura de Johnson and Cook; para ello se hace la medición de las variables presentes en la

Tabla 7, cambiando el límite de deformación unitaria con los valores que se muestran en dicha tabla.

Tamaño de elementos (mm)	0,1				
Límite de deformación unitaria	0	1	1,5	2	2,5
Ángulo de ataque (grados)	5°	5°	5°	5°	5°
Ángulo de desprendimiento (grados)	26,5°	26,5°	26,5°	26,5°	26,5°
Deformación Plástica (mm)	2,78	1,3197	2,2857	2,4936	2,8944
Deformación elástica (mm)	3,78	2,1149	3,0933	3,3255	4,3606
Esfuerzo equivalente (MPa)	1239	1239,3	1239,8	1240,9	1242,5
Esf cortante Máximo (MPa)	714,54	715,49	715,08	715,68	717,33
Factor de recalado	1,3415	1,3415	1,3415	1,3415	1,3415

Tabla 7. Variación del límite de deformación elástica unitaria en el modelo de falla de Johnson and Cook.

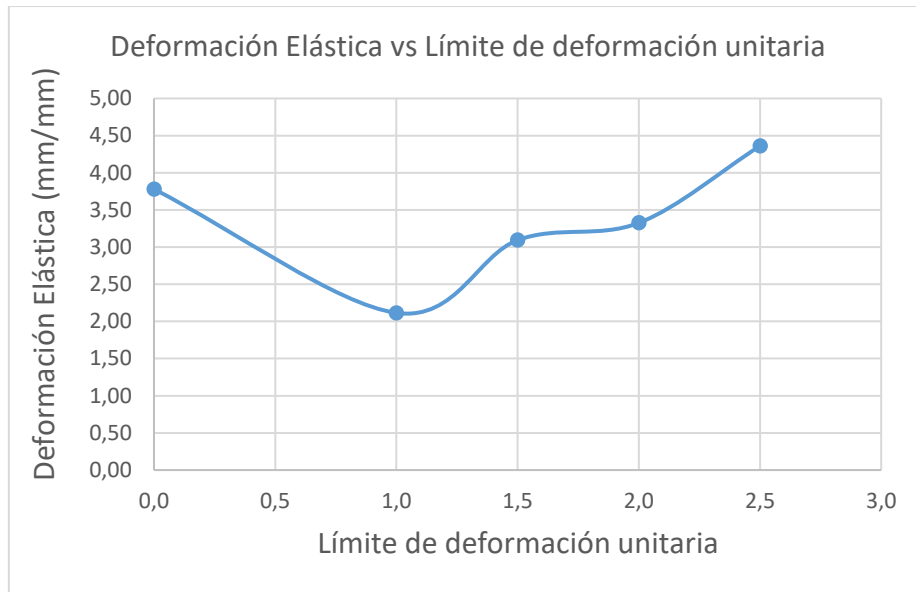


Figura 29. Deformación elástica vs Límite de deformación unitaria.

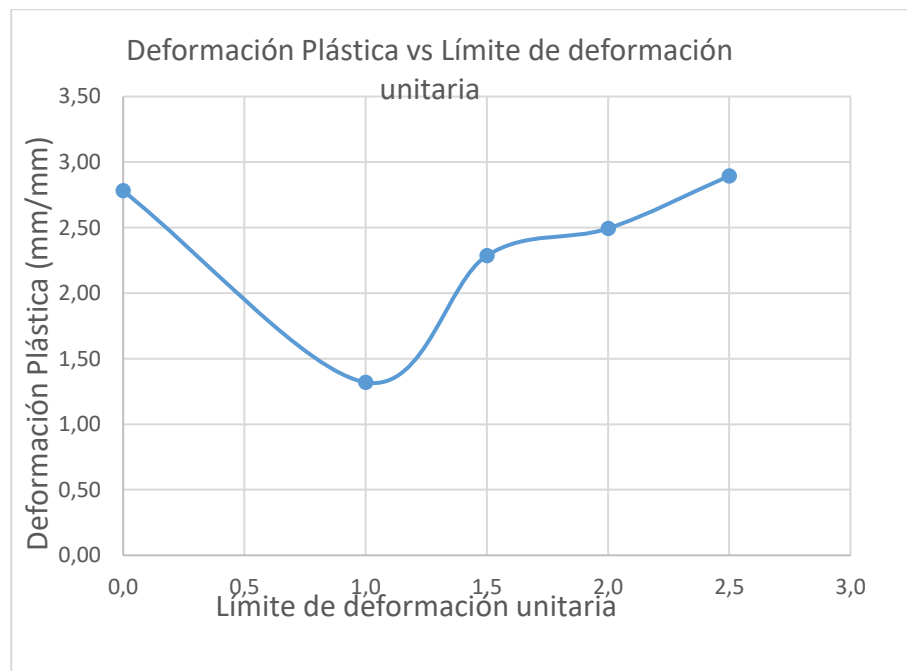


Figura 30. Deformación Plástica vs Límite de deformación unitaria

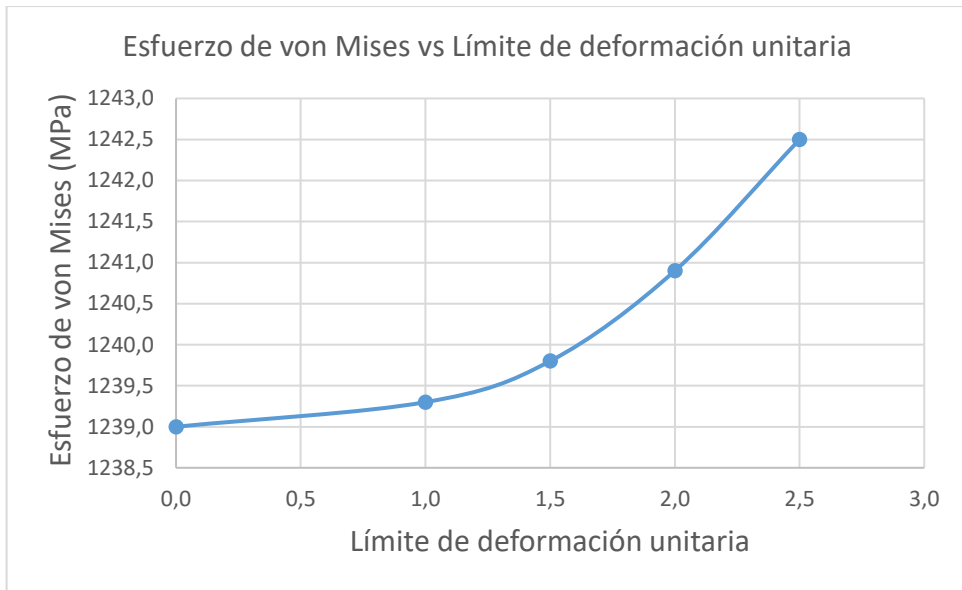


Figura 31. Esfuerzo de Von Mises vs Límite de deformación unitaria.

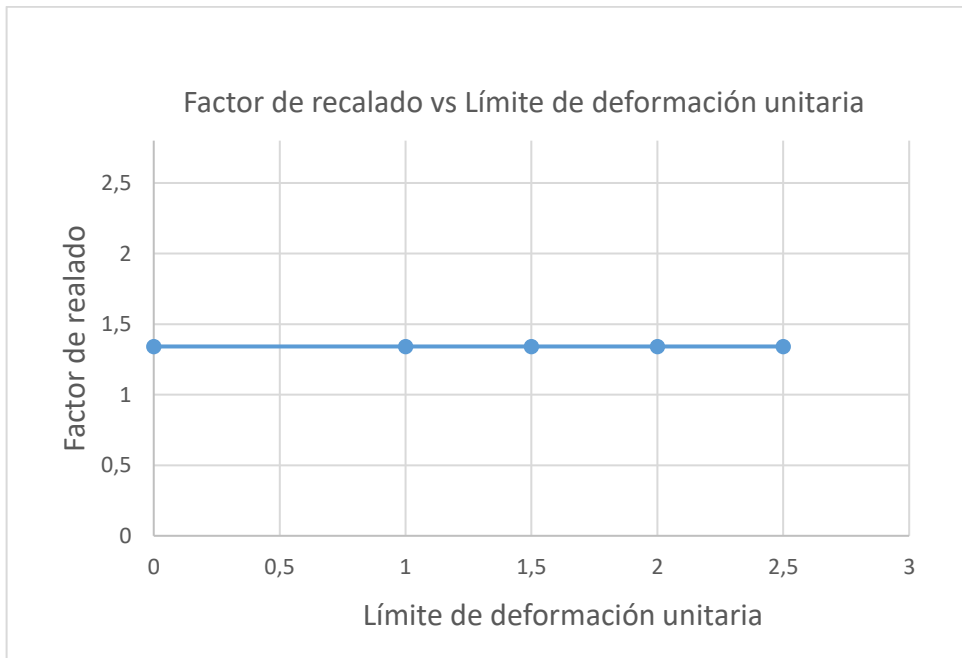


Figura 32. Factor de recalado vs Límite de deformación unitaria.

8.6. Resultados obtenidos para esfuerzos, deformaciones, y velocidad de corte en el proceso final.

Se obtiene los resultados de esfuerzos y deformaciones para una geometría con ángulo de ataque α igual a 5° , un ángulo de desprendimiento γ igual a $26,5^\circ$, tamaño de elementos con un valor de 0,1 mm y se utiliza bias factor igual a 2. También se adquiere la fuerza de corte para posteriormente hacer la comparación con lo establecido según Shaw [13].

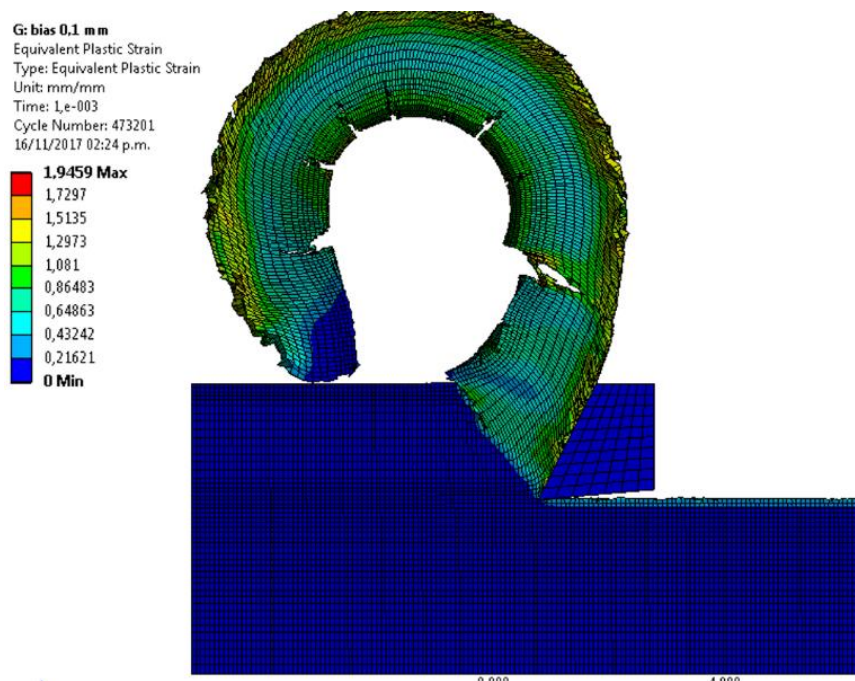


Figura 33. Deformación elástica obtenida en el experimento con tamaño de elementos de 0,1 mm utilizando bias factor.

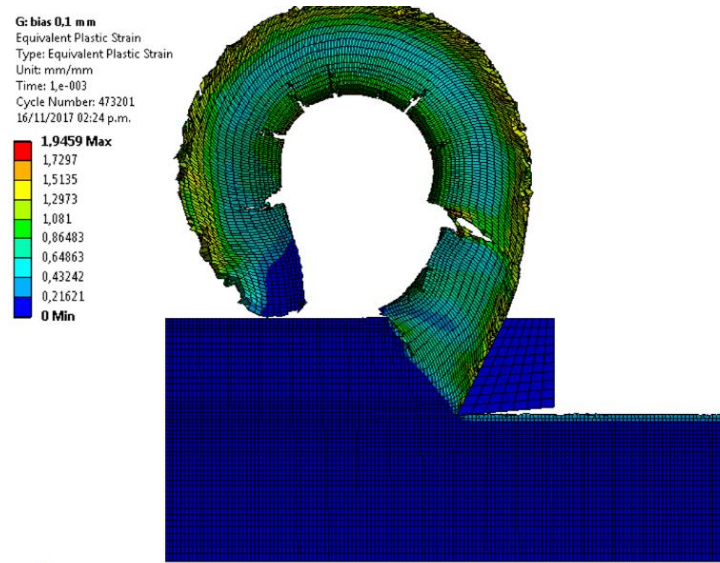


Figura 34. Deformación plástica obtenida en el experimento.

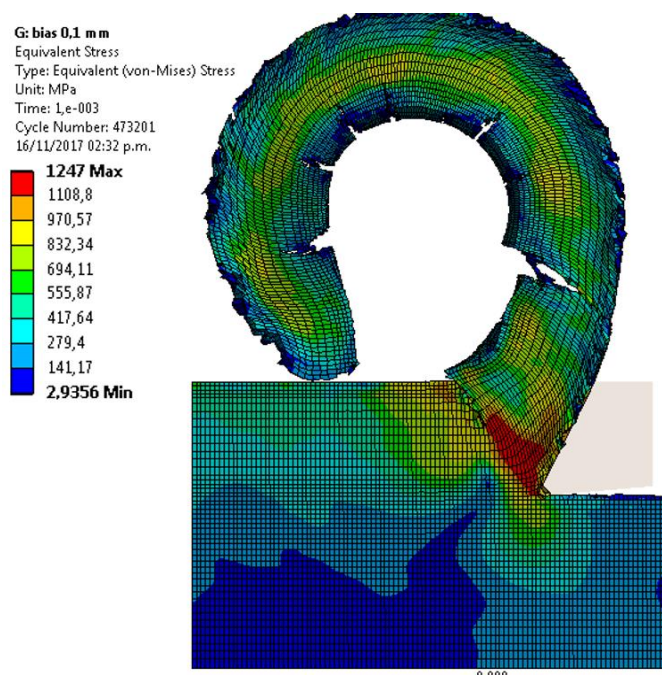


Figura 35. Esfuerzo equivalente obtenido en el experimento.

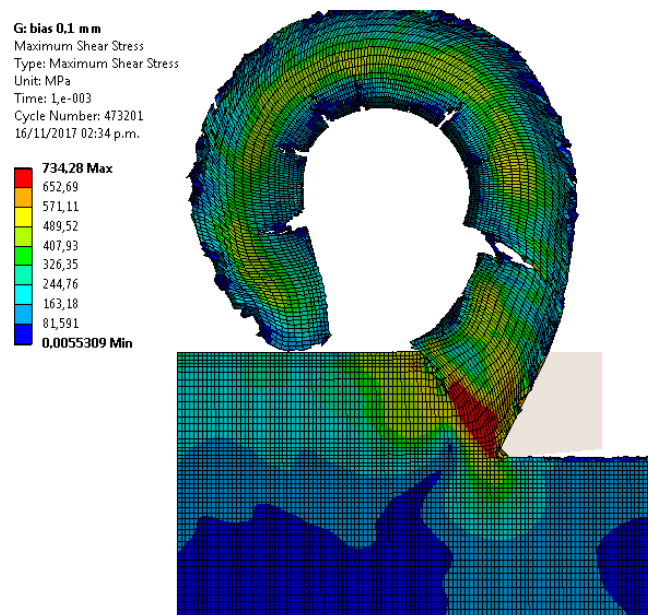


Figura 36.Esfuerzo cortante máximo obtenido en el experimento.

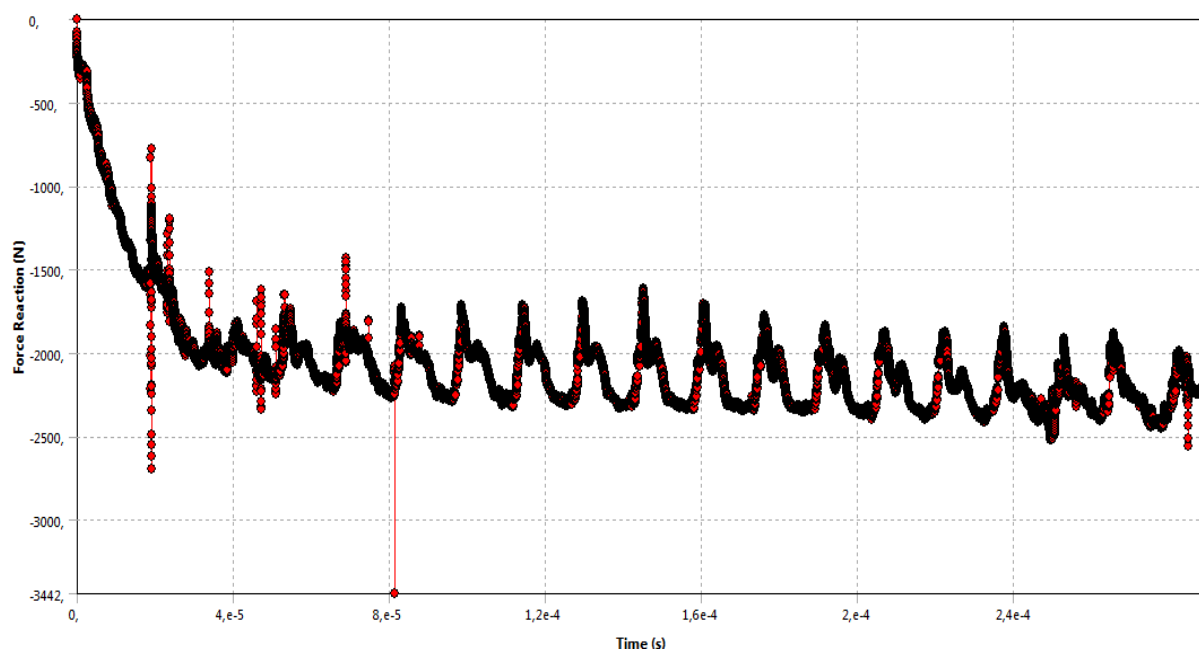


Figura 37. Fuerza de corte obtenida en el experimento

9. Análisis de resultados.

El tamaño de elementos desde que comienza la convergencia para mallado el hexaédrico es de 0,1 mm; dicha convergencia se da entre la cantidad de elementos de 16505, 4970, 78453 y 148665. Para el mallado utilizando bias factor cambia el número de elementos a 21030, 36475, 48138, 55077; pero no cambia el valor de convergencia seleccionado de 0,1 mm.

Al hacer la variación del tamaño de los elementos se originan cambios en los valores para el valor de la viruta deformada, el ángulo de cizallamiento y el factor de recalado; pero al utilizar bias factor dichos valores se mantienen constantes desde 0,35 hasta 0,10 mm como valor para tamaño de elementos con un valor de factor de recalado de 1,34.

Al realizar la variación del límite de la deformación unitaria con el modelo de falla de Johnson and Cook el valor del tamaño de la viruta deformada no cambia al igual que el factor de recalado que se mantiene constante con un valor de 1,3415.

El esfuerzo cortante y el esfuerzo equivalente de von Mises se originan en el misma zona (plano de Cizallamiento), aunque siendo diferentes. Según Shaw [13], se pueden obtener fuerzas de corte de hasta 4114 N (925 lb) para los diferentes tipos de aceros, por lo que el valor aproximado de 2000 N como fuerza de corte se encuentra en el rango teórico para el acero AISI 4340.

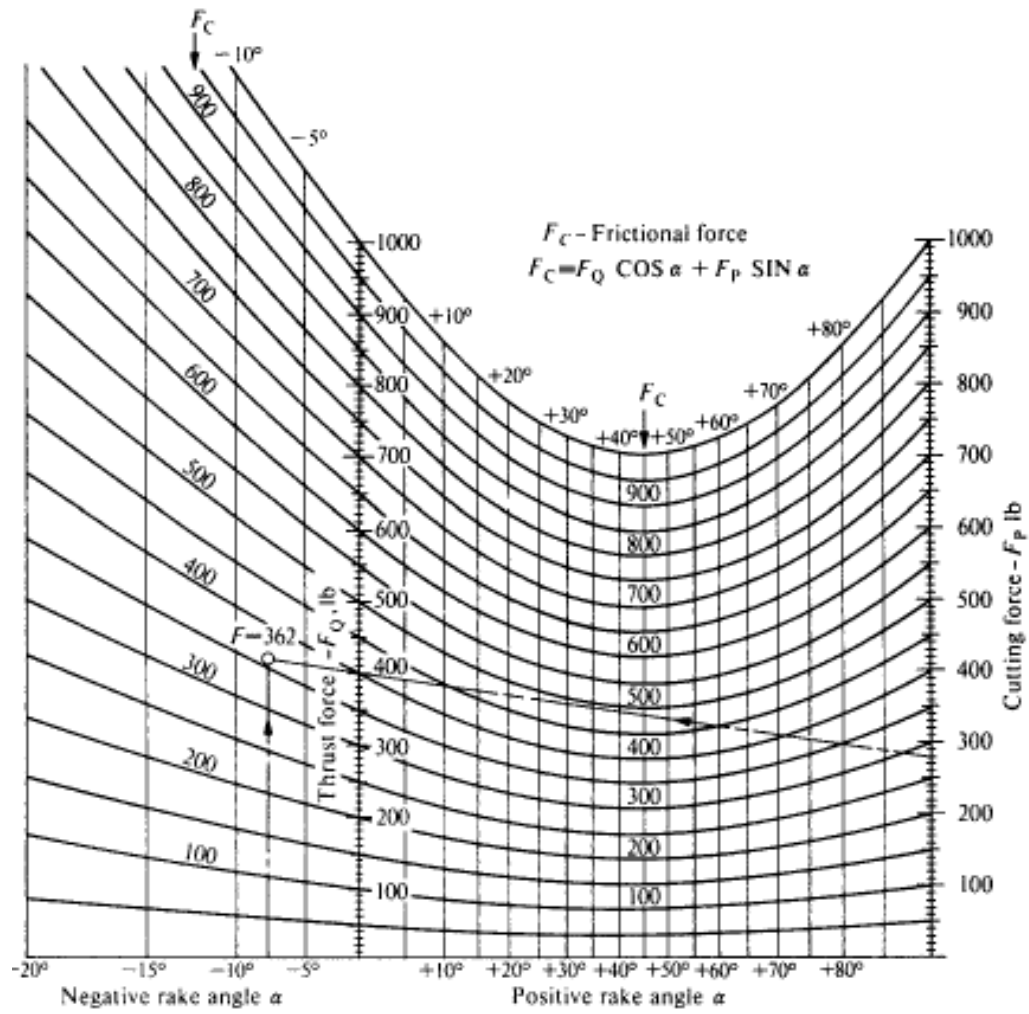


Figura 38. Relación entre el ángulo de ataque y la fuerza de corte.

10. Conclusiones.

Al realizar la independencia de malla utilizando bias factor disminuyen significativamente el número de elementos pero se logra un mallado en una de las zonas de mayor importancia en el proceso (Zona en donde se hace todo el desplazamiento axial de la herramienta de ataque). El cambio que se origina en el mallado utilizando elementos hexaédricos no es significativo, puesto que la mayor diferencia que se origina es de 0,187; en cambio en el ángulo de cizallamiento presenta una diferencia importante donde la variación del ángulo llega a ser hasta de $7,774^\circ$.

El valor de la viruta deformada, como el factor de recalado y el ángulo de cizallamiento; no cambia debido a que se origina un desprendimiento de viruta con menor erosión entre la herramienta de ataque y la zona en donde ésta se desplaza. El cambio de la deformación unitaria no altera el valor de la viruta deformada, el ángulo de cizallamiento, ni el factor de recalado; pero hace que aumente el tiempo con diferencia de hasta 5 horas de simulación al incrementar el valor de la deformación unitaria.

El valor de la fuerza de corte se encuentra en el rango establecido según Shaw para los ángulos de corte, aunque no se pueden hacer comparaciones precisas con otros experimentos debido a que la geometría utilizada en el experimento no es dimensionalmente homóloga a alguna encontrada en el libro de dicho autor.

11. Bibliografía.

- [1] A. G. Atkins, "Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: Quantitative explanations for some longstanding problems," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 45, no. 2, pp. 373–396, 2003.
- [2] M. Mahnama and M. R. Movahhedy, "Application of FEM simulation of chip formation to stability analysis in orthogonal cutting process," *J. Manuf. Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 188–194, 2012.
- [3] A. Dorogy, "Technical note : Determination of the Johnson-Cook material parameters using the SCS specimen," vol. 0.
- [4] J. . Canteli, J. . Cantero, M. . Miguélez, A. Muñoz, and X. Soldani, "Sistemas de Producción y Fabricación."
- [5] J. M. García de Lomana Moralejo, "ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN LOS RESULTADOS NUMÉRICOS A ESCALA GLOBAL Y LOCAL.," vol. 2003, no. Plan 94, pp. 2009–2009, 2007.
- [6] "Teoría de Taller," *SEAS, Estud. abiertos*.
- [7] "Elementos de un proceso de mecanizado convencional," *Dep. Mater. y Prod. Aeroesp. Esc. Técnica Super. Ing. Aeronáuticos- UPM*, pp. 1–49.
- [8] M. Rodríguez Millán, "Análisis numérico del comportamiento frente a impacto de aluminio 2024-T351 sometido a ensayo de taylor," p. 161, 2009.
- [9] L. Schwer, "Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon _ 01," *6th Eur. LS_DYNA Users' Conf.*, pp. 1–17, 2007.
- [10] V. Sánchez-Gálvez, "Tenacidad de fractura dinámica," *An. Mecánica la Fract.*, vol. 1, no. 25, pp. 3–7, 2008.
- [11] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre, and E. Filippi, "Numerical contribution to the comprehension of saw-toothed Ti6Al4V chip formation in orthogonal cutting," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 81, pp. 77–87, 2014.
- [12] K. Wang, "Calibration of the Johnson-Cook Failure Parameters As the Chip Separation Criterion in the Modelling of the Orthogonal Metal Cutting Process," p. 103, 2016.
- [13] M. C. Shaw, *METAL CUTTING PRINCIPLES Second Edition*, Second Edi. New York, 2005.